doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20259009

双波纹钢板-钢管混凝土组合异形柱的轴压性能

杨雨青[1]，孔凡昌[1]，王利辉[2]，牟在根[1]
（1. 北京科技大学 未来城市学院，北京 100083；
2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室，北京 100124）

摘 要：通过对L形双波纹钢板-钢管混凝土组合异形柱（DCP-CFST）进行轴压试验，研究了该异形柱结构的轴压稳定承载力、破坏形态. 建立加载试件的非线性精细化有限元模型，模拟DCP-CFST轴压加载过程，分析初始缺陷方向、钢板厚度、波纹钢板尺寸和异形柱高度等参数对结构承载力的影响. 结果表明：DCP-CFST具有高承载能力和良好延性；波纹钢板为核心混凝土提供有效约束，并能改善结构的局部屈曲性能；初始缺陷幅值大小和方向对承载力和破坏形态的影响不可忽略，但波纹尺寸对其影响并不显著；评估了现有钢管混凝土规范承载力公式计算DCP-CFST截面强度的准确性；提出了适用于DCP-CFST的稳定系数计算公式.

关 键 词：钢管混凝土；异形柱；波纹钢板；承载能力；初始缺陷
中图分类号：TU 392.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026（2026）02-0094-08

Axial Compressive Performance of Special-Shaped CFST Columns with Double Corrugated Steel Plates

YANG Yu-qing[1], *KONG Fan-chang*[1], *WANG Li-hui*[2], *MU Zai-gen*[1]
（1. School of Future Cities, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China. Corresponding author: MU Zai-gen, E-mail: zgmu@ces.ustb.edu.cn）

Abstract: Through axial compression tests on L-shaped concrete-filled steel tube (CFST) columns with double corrugated steel plates (DCP-CFST), the axial compression stability bearing capacity and failure modes of this special-shaped column structure were studied. A nonlinear refined finite element model of the loaded specimens was established to simulate the axial compression loading process of DCP-CFST, as well as the effects of parameters such as the direction of initial defects, steel plate thickness, corrugated steel plate size, and height of the special-shaped column on the structural bearing capacity. The results show that DCP-CFST has high bearing capacity and good ductility; the corrugated steel plates provide effective confinement for the core concrete and can improve the local buckling performance of the structure; the magnitude and direction of initial defects have non-negligible effects on the bearing capacity and failure modes, but the influence of corrugation size is not significant. The accuracy of calculating the cross-sectional strength of DCP-CFST using the existing bearing capacity formulas in the CFST specifications was evaluated, and a stability coefficient calculation formula suitable for DCP-CFST was proposed.

Key words: concrete-filled steel tube (CFST); special-shaped column; corrugated steel plate; bearing capacity; initial defect

在住宅中，框架柱的角部明显突出墙体，严重影响了内部空间的使用和家具的摆放，而异形柱能有效解决凸柱、露柱问题[1]. 钢管混凝土（CFST）是一种钢-混凝土组合结构，兼具强度

收稿日期：2025-03-24
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（FRF-TP-22-117A1）；北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放课题资助项目（2024B07）.
作者简介：杨雨青（1993—），男，云南昆明人，北京科技大学讲师，博士.
通信作者：牟在根，E-mail：zgmu@ces.ustb.edu.cn.

高、刚度大的特点,且延性良好,同时具备较高的抗震耗能性能和耐火性能[2].钢管作为混凝土的浇筑模板,具有很好的可施工性和经济性;钢管混凝土异形柱还能有效提高室内空间的利用率和灵活性.因此,该类结构在装配式住宅中的需求不断提高,展现出较大的发展潜力和应用前景.

与平钢板相比,波纹钢板的面外刚度显著提升,能够有效延缓局部屈曲.将波纹钢板应用于竖向承重结构可改善局部屈曲性能.Nassirnia等[3]将波纹钢板应用于空心钢管柱中,有效缓解了钢管柱的局部屈曲,提高了整体结构承载力.文献[4–5]提出横肋波纹钢板–方钢管混凝土组合柱,波纹钢板基本不承担轴力,对核心混凝土的约束作用强于平钢板,但波纹钢板最优波形有待进一步研究.Tong等[6]在双层波纹钢板内填混凝土,并与矩形钢管混凝土柱连接形成组合墙,无需额外的剪力连接件就可以保证钢板与混凝土共同工作,但承载力试验结果与现有规范设计公式相比最大误差为18.2%[7].文献[8–9]对竖向双波纹钢板内填混凝土组合剪力墙的轴压受力机理和稳定承载力进行了研究.文献[10–12]研究了单腔波纹钢板混凝土在轴压下的约束机制,承载力强化系数大于1.2.

本文提出L形波纹钢板–钢管混凝土组合异形柱(DCP–CFST),由波纹钢板连接方钢管,并在内部填充混凝土,形成多腔组合异形柱结构.结合试验研究、理论分析和数值模拟方法,研究L形DCP–CFST的承载性能,讨论现有CFST截面强度计算方法对L形DCP–CFST的适用性.

1　试验概况

1.1　试件设计

设计L形DCP–CFST轴压试件,试件由方钢管、波纹钢板和内填混凝土组成,其几何尺寸如图1所示.主要参数如下:方钢管宽度b_t为150 mm,厚度d_t为4 mm;波纹钢板宽度b_p为150 mm,厚度d_c为4 mm,单波纹尺寸q_1,q_2,q_3分别为50,25,50 mm,波幅a_w为25 mm;异形柱高度H为3 000 mm,上下加载端有30 mm厚的钢板,并在方钢管和波纹钢板形成的多腔室内部填充C30等级混凝土.

1.2　测点布置

图2中显示了应变和位移测点的布置.沿异形柱高度方向,每隔H/4高度布置4个位移计监测DCP–CFST试件水平方向位移.在加载板4角位置布置4个拉线式位移计,监测试件轴向压缩变形.

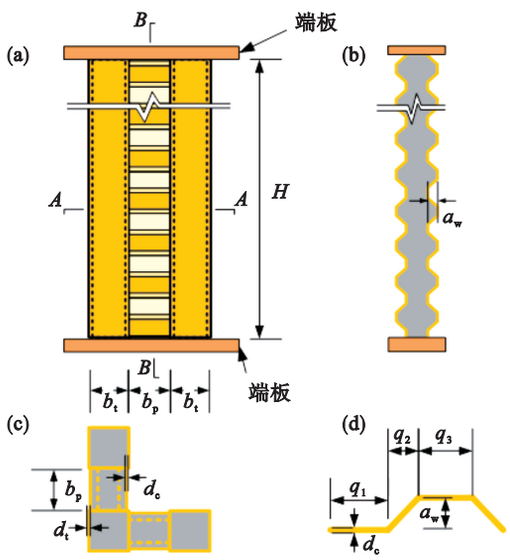
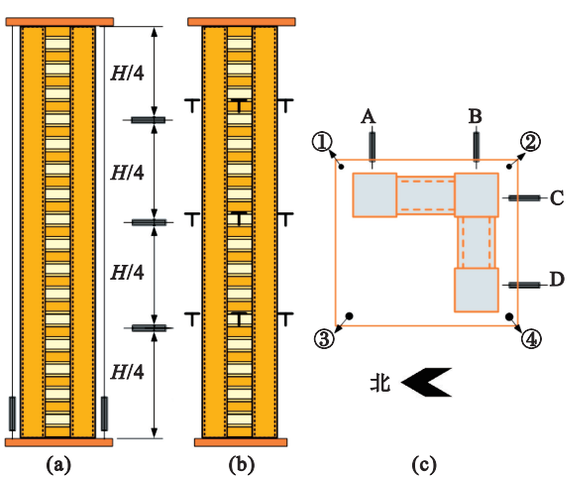


图1　DCP–CFST的几何尺寸

Fig. 1　Geometric dimensions of DCP–CFST

(a)—主视图;(b)—*B*–*B*截面剖面图;(c)—*A*–*A*截面剖面图;(d)—波纹尺寸.



注:A,B,C,D为位移计;①②③④为拉线式位移计.

图2　应变和位移测点布置

Fig. 2　Strain and displacement measurement points arrangement

(a)—位移计布置;(b)—应变片布置;(c)—位移计平面布置图.

1.3　加载方案

加载装置如图3所示.试件通过球铰固定在压力机上,球铰加载点位于试件截面的形心位置.将波纹混凝土等效为矩形混凝土,长度保持不变,宽度取最大与最小波纹宽度距离的平均值,然后截面形心取各部分强度换算后的截面形

心.试验前预加载200 kN,检查测量仪器是否连接正常.正式加载时,采用位移控制加载,速率为0.5 mm/min.当荷载下降到峰值荷载的70%左右,或变形过大时停止加载.

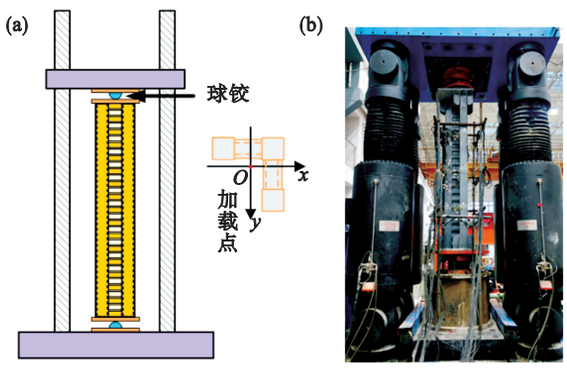


图3 加载装置

Fig. 3 Loading device

(a)—加载装置示意图;(b)—加载装置实物图.

1.4 钢材与混凝土材料性能试验

采用C30等级混凝土,150 mm标准试块的立方体抗压强度为35.1 MPa.方钢管和波纹钢板采用Q355钢,钢材拉伸试验结果如表1所示.

表 1 钢材拉伸试验结果

Table 1 Results of steel tensile tests

材料	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
方钢管	3.94	382	512	194
波纹钢板	3.89	393	536	203

2 试验结果

2.1 试验现象

试件DCP-CFST的失效模式如图4所示.在加载初期,试件无明显变化.随着加载进行,当承载力达到3 700 kN时,方钢管上出现局部屈曲半波,但波纹钢板无明显变化.试件表现出受压整体屈曲变形趋势,在试件1/2高度处沿截面对称轴方向出现凸起.当承载力达到5 801 kN后,承载力开始下降,在试件1/2高度处的面外变形量达到10 mm,水平变形量与高度之比为0.33%.由于横截面的对称性,试件的整体屈曲绕非对称轴弯曲.在试件1/2高度处,以及异形柱底部可观察到明显的方钢管局部屈曲,但波纹钢板没有明显变形,表明波纹钢板能有效改善连接段的局部屈曲性能.随着竖向位移继续增大,整体屈曲变形明显,受压方钢管的屈曲半波变形增大.当承载力下降至4 424 kN时,相比峰值承载力下降25%,试验终止加载.

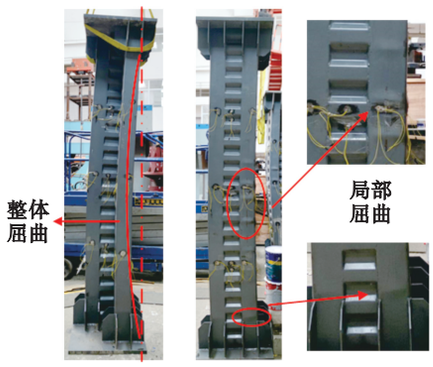


图4 DCP-CFST的失效模式

Fig. 4 Failure mode of the DCP-CFST

2.2 荷载-位移曲线

试件DCP-CFST的荷载-位移曲线如图5所示.加载初期,试件基本处于弹性阶段,荷载-位移呈线性关系.试件承载力达到峰值承载力的64%($0.64N_p$)后,加载曲线进入非线性阶段.试件的峰值承载力N_p为5 801 kN,竖向位移Δ_p为9.14 mm.随着竖向继续加载,承载力开始下降,试件的整体屈曲变形显著增加.试件承载力下降到峰值承载力的85%($0.85N_p$)时,竖向位移$\Delta_{0.85}$为16 mm.最终当承载力下降到峰值承载力的74%($0.74N_p$)后,试件将与支架接触,此时停止加载.

用延性系数μ评估试件的塑性变形能力,如式(1)所示.Δ_y为钢材屈服时的位移,由几何作图法确定[13].试件的屈服位移Δ_y为6.66 mm,对应的承载力N_y为5 267 kN,计算出DCP-CFST的延性系数μ为2.40.

$$\mu=\frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y}. \tag{1}$$

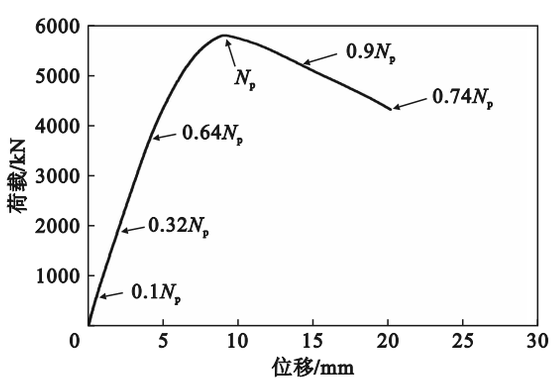


图5 试件DCP-CFST的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of specimen DCP-CFST

2.3　侧移分析

图6为试件DCP-CFST在水平方向的位移计测量得到的结果.由于横截面的对称性,在加载过程中,试件水平变形值沿东西方向和南北方向大致相同,方向如图2所示.在承载力达到0.64N_p之前没有明显的变形.当达到峰值承载力N_p时,试件在H/2处的横向变形为10 mm.随着加载的继续,试件的变形迅速增大,向西北侧凸曲变形,而承载能力下降.当承载力为0.74N_p时,西侧和北侧的最大变形约为50 mm.

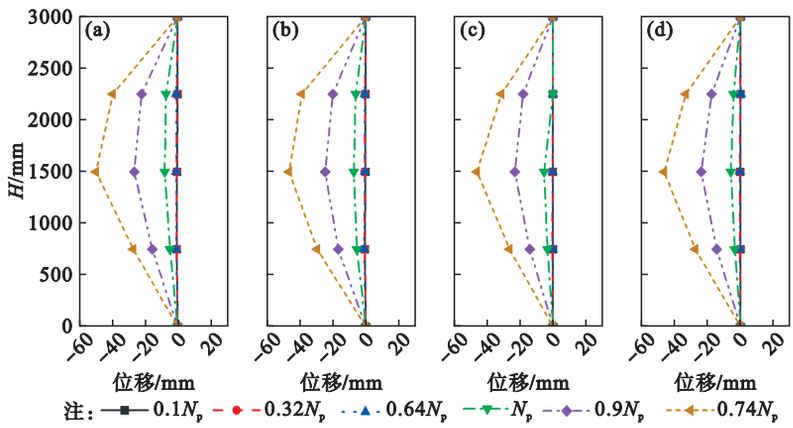


图6　DCP-CFST水平位移

Fig. 6　Horizontal displacement of DCP-CFST

(a)—位移计A测点数据;(b)—位移计B测点数据;(c)—位移计C测点数据;(d)—位移计D测点数据.

3　有限元分析

3.1　模型尺寸参数及材料属性

采用ABAQUS建立试件DCP-CFST有限元模型.方钢管和波纹钢板采用四边形壳体单元S4R模拟,混凝土采用三维减缩积分单元C3D8R模拟.方钢管与波纹钢板之间的焊接采用绑定模拟,钢与混凝土之间的接触在法线方向定义为硬接触,在切线方向定义为摩擦接触,摩擦系数为0.15[14].通过改变网格尺寸分析网格敏感性,网格尺寸选为40 mm可以平衡模拟结果准确性与计算速度.参考点1和参考点2位于横截面的形心点.DCP-CFST底部的3个平移自由度和3个旋转自由度与参考点2进行刚体约束绑定.顶部约束于参考点1,并施加位移以模拟加载过程.屈曲模态如图7所示,一阶屈曲模态为绕L形截面非对称轴x'轴的整体屈曲,二阶屈曲模态为绕L形截面对称轴y'轴的整体屈曲.考虑到结构的几何初始缺陷,根据文献[15]规定,初始缺陷可取柱高的1/1 000,根据实测试件的缺陷方向,东西向最大缺陷为3 mm,南北向最大缺陷为2 mm,与一阶屈曲模态相反,因此以一阶屈曲模态的负方向为缺陷分布,对试件的加载过程进行模拟.

钢材的屈服强度取382 MPa,弹性模量为206 000 MPa,泊松比为0.3.钢材本构关系为双折线弹塑性模型,强化阶段的斜率为弹性模量的0.5%.混凝土的本构关系选自文献[16]的模型,该模型适用于CFST核心混凝土受压时的塑性行为.混凝土塑性模型的材料参数见文献[17].

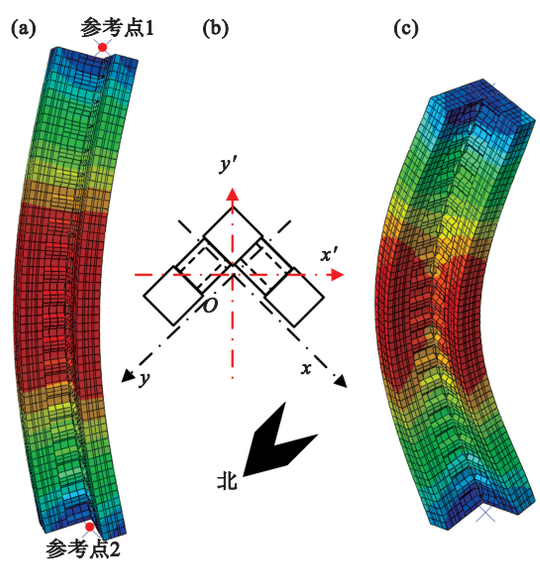


图7　屈曲模态

Fig. 7　Buckling mode

(a)——一阶屈曲模态;(b)—截面对称轴;(c)—二阶屈曲模态.

3.2　荷载-位移曲线

图8为试验和有限元模拟的DCP-CFST在轴压加载下的荷载-位移曲线,图9为试验与有限元模型的最终变形.模型结果与试验结果吻合,表明有限元模型能较准确模拟DCP-CFST在轴压作用下的承载力和变形.提取模型底部的方钢

管、波纹钢板、方钢管内混凝土和波纹钢板内混凝土的内力，可以得到各部分在轴压作用下的承载力．有限元模型的峰值承载力为 5 805 kN，其中 42.8% 由 3 根方钢管贡献，30.8% 由填充在方钢管中的混凝土贡献，23% 由填充在波纹钢板中的混凝土贡献，3.4% 由波纹钢板贡献．即单个方钢管内混凝土平均提供约 10.3% 的承载力，而波纹钢板内混凝土平均提供 11.5% 的承载力．波纹钢板内混凝土相较于方钢管内混凝土的承载力下降较为平缓．波纹钢板内混凝土截面在纵向并不均匀，并且相比方钢管内混凝土的截面面积较小，但是波纹钢板内混凝土的承载力更大，这是由于波纹钢板的面外刚度更大，环向约束效果更好，使得波纹钢板内混凝土承载力要高于方钢管内填充混凝土．然而，波纹钢板在波纹方向刚度很小，对 DCP−CFST 竖向承载力的贡献不到 4%，可以忽略不计．

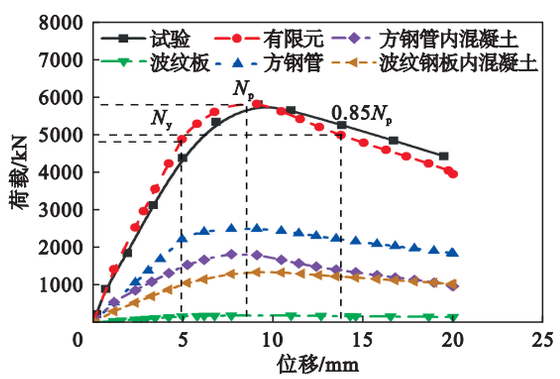


图 8 DCP−CFST 承载力

Fig. 8 Bearing capacity of DCP−CFST

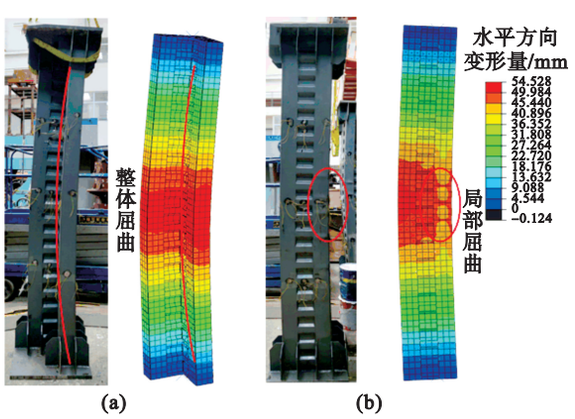


图 9 DCP−CFST 试验与有限元验证

Fig. 9 DCP−CFST test and finite element verification

(a)—整体屈曲对比；(b)—局部屈曲对比．

3.3 初始缺陷方向影响

图 10 为不同初始缺陷角度 θ(0°~360°)和初始缺陷幅值 Δ_0(异形柱高度 H 的 1/1 000，1/750，1/500)对试件承载力的影响．由于试件截面存在 1 个对称轴，因此缺陷角度变化以对称轴对称．当缺陷幅值取异形柱高度 H 的 1/1 000 时，在初始缺陷角度为 0°时，承载力达到最小值，而在初始缺陷角度为 180°时，承载力达到最大值．随着初始缺陷幅值的增大，最大值与最小值的差距增大，这表明在初始缺陷幅值较大时，试件承载力对初始缺陷方向较为敏感．随着初始缺陷幅值的增加，当初始缺陷角度小于 90° 和大于 270° 时，DCP−CFST 的承载力呈下降趋势．当缺陷角度在 90°~270°时，缺陷幅值越大，DCP−CFST 的承载力越大．但在缺陷幅值为 H/500、初始缺陷角度为 180°时，DCP−CFST 的承载力出现明显下降，从有限元的变形分析可知此时初始缺陷较大，DCP−CFST 的整体破坏形态发生改变，如图 11 所示．当缺陷较小时，DCP−CFST 最终破坏模态与一阶屈曲模态相近，并且当缺陷与一阶屈曲模态相反时承载力最大．当缺陷较大时，DCP−CFST 的最终破坏形态与初始缺陷模态相近，承载力会出现不规律的变化．

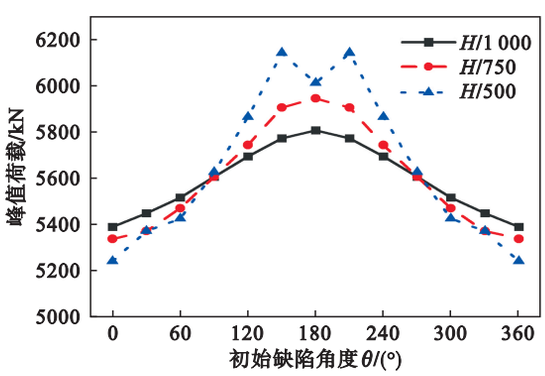


图 10 初始缺陷角度对承载力的影响

Fig. 10 Influence of initial defect angle on bearing capacity

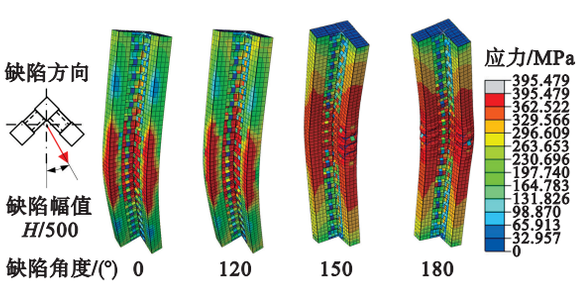


图 11 不同初始缺陷方向对承载力的影响

Fig. 11 Influence of different initial defect directions on bearing capacity

3.4 参数分析

改变波纹钢板的波幅高度、单波长度，钢板厚度和异形柱高度，研究影响参数对 DCP−CFST 承载力的影响．结果如表 2 所示．

表 2　参数分析结果

Table 2　Results of parameter analysis

模型编号	H/mm	t_t/mm	t_c/mm	a_w/mm	q_1/mm	q_2/mm	q_3/mm	N_u	μ
1	3 000	4	1	25	50	25	50	4 484	2. 11
2	3 000	5	1	25	50	25	50	5 087	2. 21
3	3 000	6	1	25	50	25	50	5 665	2. 34
4	3 000	4	2	25	50	25	50	4 624	2. 20
5	3 000	4	4	25	50	25	50	4 838	2. 64
6	3 000	4	1	15	50	25	50	4 550	2. 18
7	3 000	4	1	35	50	25	50	4 338	2. 21
8	3 000	4	1	25	75	37. 5	75	4 391	2. 06
9	3 000	4	1	25	100	50	100	4 422	2. 21
10	3 000	4	1	25	150	75	150	4 347	2. 20
11	600	4	1	25	50	25	50	5 150	2. 91
12	6 000	4	1	25	50	25	50	3 460	1. 82
13	9 000	4	1	25	50	25	50	2 380	2. 10

随着方钢管厚度 t_t 增加,DCP-CFST 承载力明显提高.与 4 mm 方钢管厚度的 DCP-CFST 相比,5 mm 和 6 mm 方钢管厚度的 DCP-CFST 承载力分别提高了 13% 和 26%.方钢管的钢板厚度能近似正比地提高结构承载力.随波纹钢板厚度 t_c 增大,DCP-CFST 承载力提高并不显著.

随着波纹钢板波幅 a_w 的增加,DCP-CFST 的承载力略有下降.与 15 mm 波幅相比,25 mm 和 35 mm 波幅的 DCP-CFST 承载力分别降低了 1.5% 和 4.6%.原因是波幅增大导致波纹腔内混凝土的最窄距离减小,这一缩减导致有效横截面积减小,最终导致 DCP-CFST 的承载能力降低.波纹钢板的单波长度(q_1,q_2,q_3)对 DCP-CFST 承载力的影响较小.DCP-CFST 的承载力变化在 3% 以内.这表明波纹钢板波长的变化对 DCP-CFST 整体轴向抗压性能的影响不大.

当 DCP-CFST 的高度 H=600 mm 时,其承载力为 5 152 kN.DCP-CFST 的承载力随异形柱高度增大(H 为 3 000,6 000,9 000 mm),其承载力相比短柱承载力,分别下降了 13%,33%,54%.

4　承载力计算方法

4.1　CFST 截面强度计算方法适用性

目前用于计算 CFST 全截面屈服荷载的计算方法可分为 2 大类:①统一理论.该理论将钢管和核心混凝土视为复合材料,并考虑了钢管对核心混凝土的约束效应;②叠加理论.该理论将钢管和核心混凝土的承载能力叠加,但不考虑钢管对核心混凝土的约束效应.文献[18-23]及文献[2]的有关计算公式如式(2)~式(7)所示.

$$N_y = f_y A_s + f_{ck} A_c \text{ [18-19]}. \tag{2}$$

$$N_y = f_y A_s + 0.85 f_c' A_c \text{ [20]}. \tag{3}$$

$$N_y = f_y A_s + f_c' A_c \text{ [21]}. \tag{4}$$

$$N_y = 0.9 f_y A_s + 0.6 f_c' A_c \text{ [22]}. \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned} &N_y = (A_s + A_c) f_s, \\ &f_s = (1.18 + 0.85\xi) f_{ck}\ 0.2 \leqslant \xi \leqslant 5. \end{aligned}\right\} \text{ [2]} \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned} &N_y = (A_s + A_c) f_s, \\ &f_s = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_{ck}, \\ &B = 0.131 f_y/213 + 0.723, \\ &C = -0.070 f_{ck}/14.4 + 0.026. \end{aligned}\right\} \text{ [23]} \tag{7}$$

式中:N_y 为截面强度;f_y 为钢材屈服强度;A_s 和 A_c 分别为钢材和混凝土的截面面积;f_{ck} 和 f_c' 分别为混凝土立方体抗压强度标准值和圆柱体抗压强度设计值;f_s 为钢材和混凝土统一强度;ξ 是钢管混凝土的套箍系数.

根据现有 CFST 轴压承载力的公式计算短柱 DCP-CFST(H=600 mm)的轴压承载力,计算结果如图 12 所示,$N_{y,公式}$ 为理论方法计算结果,$N_{y,有限元}$ 为有限元模拟结果.可以看出,采用文献[21,23]和文献[2]的计算结果与有限元计算结果较为接近,但比有限元计算结果低 8% 左右,偏于保守.其他计算方法的误差都在 10% 以上,容易造成材料浪费,尤其是文献[22],对混凝土强度折减较大,不适用于 DCP-CFST 截面强度预测.

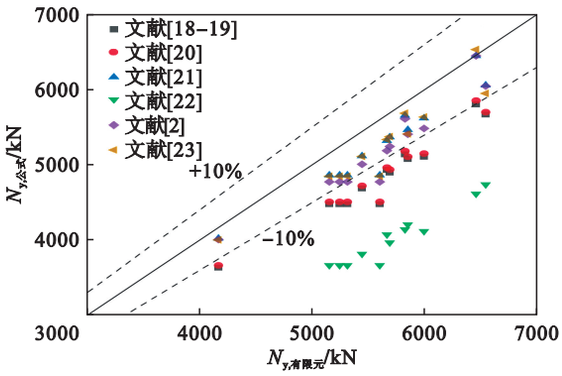


图 12 DCP-CFST 轴压承载力计算结果对比

Fig. 12 Comparison of calculation results of DCP-CFST's axial compression bearing capacity

4.2 截面稳定承载力

长柱的承载力受到整体稳定性的影响,一般采用稳定系数 φ 乘以截面强度 N_y 得到稳定承载能力 N_u,如式(8)所示.稳定系数 φ(式(9))是与正则化长细比 λ_n(式(10))有关的参数.采用文献[19]中对组合钢管混凝土异形柱计算公式和文献[7]提出的多腔波纹钢管混凝土墙的 φ-λ_n 计算公式,验证其对 DCP-CFST 的适用性,如图 13 所示,现有计算方法对 DCP-CFST 稳定系数的计算结果偏高,偏于不安全.本文提出 DCP-CFST 的设计公式,采用欧洲规范[24]的轴压稳定系数计算形式,如式(11)所示.其中 α=0.7 和 β=0.1 是从 φ-λ_n 曲线数据点包络线中获得的参数,则 DCP-CFST 的稳定系数计算公式如式(12)所示,可为设计提供参考依据.

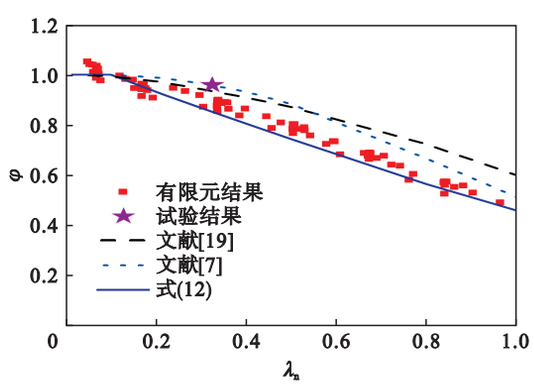


图 13 φ-λ_n 曲线

Fig. 13 φ-λ_n curves

$$N_u=\varphi N_y, \tag{8}$$

$$\varphi=1, 0\leqslant\lambda_n\leqslant 0.1;$$

$$\varphi=\frac{1}{\Phi+\sqrt{\Phi^2-\lambda_n{}^2}}, 0.1<\lambda_n. \tag{9}$$

$$\lambda_n=\sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}}}, \tag{10}$$

$$\Phi=0.5\left[1+\alpha(\lambda_n-\beta)+\lambda_n^2\right], \tag{11}$$

$$\Phi=0.5\left[1+0.7(\lambda_n-0.1)+\lambda_n^2\right]. \tag{12}$$

式中:N_{cr} 为截面弹性屈曲临界强度;Φ 是计算稳定系数的相关参数.

5 结 论

1) DCP-CFST 结构具有良好的承载力和延性,延性系数为 2.40.建立有限元模型,通过分析该模型轴压荷载-位移曲线,评价钢管、波纹钢板和填充混凝土对轴压承载力的贡献.波纹钢板对竖向荷载的贡献小,可以忽略不计.相比平钢板,波纹钢板面外刚度更大,对混凝土有很好的约束作用.

2) 通过参数分析,初始缺陷角度影响结构的承载力,当初始缺陷角度与屈曲模态反向时,会提高结构的承载力.但是初始缺陷角度较大时会改变结构的最终破坏形态.

3) 现有 CFST 截面强度设计方法低估了 DCP-CFST 的截面强度,可以用于偏于保守的计算截面强度,但现有稳定系数计算公式高估了 DCP-CFST 的稳定性.本文提出了适用于 DCP-CFST 的稳定承载力计算公式.

参 考 文 献:

[1] 闫翔宇,张天柱,张希,等.H 型钢连接 L 形方钢管混凝土组合异形柱偏压性能研究[J].建筑结构,2023,53(3):64-71.
(Yan Xiang-yu, Zhang Tian-zhu, Zhang Xi, et al. Research on behavior of L-shaped columns composed of concrete-filled square steel tubes connected by H-shaped steel subjected to eccentric compression [J]. *Building Structure*, 2023, 53(3): 64-71.)

[2] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].3 版.北京:科学出版社,2016.
(Han Lin-hai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)

[3] Nassirnia M, Heidarpour A, Zhao X L, et al. Innovative hollow columns comprising corrugated plates and ultra high-strength steel tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 101: 14-25.

[4] 张世钧,邹昀,王城泉,等.横肋波纹钢板-方钢管混凝土组合柱双向偏压力学性能研究及承载力计算[J].工程力学,2021,38(6):81-90.
(Zhang Shi-jun, Zou Yun, Wang Cheng-quan, et al. Behaviour and bearing capacity of concrete-filled horizontal corrugated steel plate-tubular composite columns under bi-axial eccentric compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(6): 81-90.)

[5] Zou Y, Wang L, Sun Z X, et al. Experimental and numerical studies of concrete-filled corrugated steel tubular column under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2023, 276: 114813.

[6] Tong J Z, Yu C Q, Tong G S, et al. Experimental study on

axial resistant behavior of multi-celled corrugated-plate CFST walls［J］. *Engineering Structures*, 2023, 295: 116795.

［7］ 童精中, 俞超群, 童根树, 等. 多腔波形钢板组合墙的轴压整体稳定性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 240−251, 285.
(Tong Jing-zhong, Yu Chao-qun, Tong Gen-shu, et al. Stability behavior of multi-celled corrugated-plate concrete filled steel tubular walls[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(5): 240−251, 285.)

［8］ Wang M Z, Guo Y L, Zhu J S, et al. Flexural-torsional buckling and design recommendations of axially loaded concrete-infilled double steel corrugated-plate walls with T-section[J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 110345.

［9］ Zhu J S, Guo Y L, Wang M Z, et al. Strength design of concrete-infilled double steel corrugated-plate walls under uniform compressions［J］. *Thin-Walled Structures*, 2019, 141: 153−174.

［10］ Li X, Liao X, Li Z Y, et al. Confinement mechanism of rectangular CFST components using double horizontally-corrugated steel plates[J]. *Structures*, 2023, 57: 105107.

［11］ 阴冬冬. 新型矩形波纹钢管混凝土柱的轴压与偏压性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
(Yin Dong-dong. Behavior of novel rectangular corrugated CFST columns under axial/eccentric compression［D］. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.)

［12］ Liao X, Li X, Zhao S D, et al. Behavior of eccentrically loaded rectangular CFST components for shear walls using double horizontally-corrugated steel plates[J]. *Engineering Structures*, 2024, 303: 117470.

［13］ 牟在根, 杨雨青. 侧边开洞–斜向槽钢加劲钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 65−75.
(Mu Zai-gen, Yang Yu-qing. Experimental study on seismic behavior of oblique channel stiffened steel plate shear wall with side openings［J］. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(6): 65−75.)

［14］ Chen C C, Ko J W, Huang G L, et al. Local buckling and concrete confinement of concrete-filled box columns under axial load［J］. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78: 8−21.

［15］ 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)

［16］ 韩林海, 陶忠. 方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 17−25.
(Han Lin-hai, Tao Zhong. Study on behavior of concrete filled square steel tubes under axial load［J］. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(2): 17−25.)

［17］ 高珺恺. L形截面多腔钢管混凝土异形柱承载性能研究[D]. 北京:清华大学,2021.
(Gao Jun-kai. Study on bearing capacity of L-shaped irregularly concrete-filled steel tube columns［D］. Beijing: Tsinghua University, 2021.)

［18］ 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程:CECS 159—2004［S］. 北京:中国计划出版社,2004.
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members: CECS 159—2004[S]. Beijing: China Planning Press, 2004.)

［19］ 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土组合异形柱结构技术规程:T/CECS 825—2021［S］. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for special-shaped column structure composed of concrete-filled rectangular steel tubes: T/CECS 825—2021［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.)

［20］ American Institute of Steel Constructuin. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360—22［S］. Chicago: American Institute of Steel Construction (AISC), 2022.

［21］ European Committee for Standardization. Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures part 1−1: general rules and rules for buildings: EN 1994−1−1—2004［S］. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

［22］ Standards Australia Committee. Bridge design part 6: steel and composite construction: AS 5100.6—2017［S］. Sydney: Standards Australia, 2017.

［23］ 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢管混凝土结构技术规范:GB 50936—2014［S］. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)

［24］ European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures part 1−1: general rules and rules for buildings: EN 1993−1−1—2005［S］. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.